Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 2, 2023, p. 101-115

Analysis of Workspace and Kinematics of *Robot Manipulator* for Product Handling in Agricultural Farm

S. I. Shariati[1], M. H. Aghkhani[2*], M. R. Golzarian[3], A. A. Akbari[4]

1- Ph.D. Candidate of Biosystem Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Professor of Biosystem Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Associate Professor of Biosystem Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
4- Associate Professor of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: aghkhani@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2020.39236

Received: 21 April 2020 Revised: 06 September 2020 Accepted: 02 December 2020 Available Online: 02 December 2020	**How to cite this article:** Shariati, S. I., Aghkhani, M. H., Golzarian, M. R., & Akbari, A. A. (2023). Analysis of Workspace and Kinematics of *Robot Manipulator* for Product Handling in Agricultural Farm. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(2), 101-115. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2020.39236

Introduction

Robots have been used for material handling for many years, and their applications have greatly expanded with the integration of intelligent technologies. While numerous researchers have proposed various robots for this field, it is crucial to design customized configurations that are suitable for agricultural farms. However, research in our country has been limited to a few mobile agricultural robots. The main focus of this paper is to design and model workspaces and analyze the kinematics of manipulators in agricultural settings.

Materials and Methods

This article investigates the workspace and kinematics of a robot manipulator to design and manufacture a four-DOF manipulator for farming. This manipulator will be capable of performing a variety of tasks, but the goal of this project is to enable it to load and unload materials and products on the farm as an auxiliary force for the farmer.

When designing and analyzing a manipulator, the first step is to determine the specific task that the robotic arm will perform. For example, consider a scenario where the task involves loading or unloading forage packages from a trailer at a designated location. This task specification forms the basis for further design and analysis, ensuring that the manipulator is appropriately designed to meet the requirements of the task.

An intelligent robotic arm that is attached to a tractor can perform this operation in the shortest possible time without the intervention of human workers. Otherwise, a large number of laborers would be required to move boxes weighing 10 kg over distances of 3 to 4 meters and heights of 1 to 2 meters, which would require a great deal of torque.

At this stage, the design of the arm kinematics model, direct kinematic equations, velocity kinematics, and Jacobian matrix solving were performed. The calculations were carried out using two methods: manual calculation and kinematic modeling in MATLAB software for three arm configurations in two simulation tests. The results of both methods were compared.

The workspace analysis of the selected manipulator configurations, as well as the use of arm kinematic performance evaluation indices, were illustrated in graphs.

Results and Discussion

The issue of moving forage packages on the farm is described below. If a farmer were to move 48 packages of fodder weighing about 10 kg manually (using human workers) in the workspace modeled in Figure 10, each package would take an average of 30 seconds to be moved reciprocally along an unobstructed path. Hence, it would take approximately 24 minutes to move all the packages. However, the linear speed of the final operator of the robot arm during the first test was found to be 1 meter per second, which is 3.7 times faster than the

manual work scenario, and the total movement of the packages can be completed in about 6.5 minutes.

Upon analyzing the velocity diagrams of the final performer in both tests, it becomes evident that there is not much variation in speed and acceleration due to the change in configurations. The evaluation of robot workspace indicators was conducted using two methods: workspace index and structural length index. These indicators were calculated for all three configurations, and the results indicated that Configuration Type 1 was the most suitable option. Furthermore, the manipulability index of the robot arm was assessed based on the obtained diagrams for all three configurations in the two tests. It was observed that Configuration Type 1 outperformed the other two types in terms of score, indicating its superior performance. This aligns with the suggestion made by Yoshigawa for the first three joints of the Puma robot.

Overall, the results suggest that Configuration Type 1 is one of the most favorable options, ensuring better performance for the final performer.

Conclusion

One of the main considerations when using robots in agriculture is the appropriate kinematic design of joints and links for work operations. Using the example of robots assisting with moving products on the ground, it can be seen that using robots significantly reduces the time required compared to manual labor. Furthermore, in terms of energy consumption and cost within a certain period, the use of robots has economic justification.

Based on the studies conducted, Configuration Type 1 passed the kinematic path in both tests with a higher manipulability index and a more suitable workspace index based on both calculated criteria. Therefore, this configuration is recommended for the design of robots for the operation of moving products on the ground.

Keywords: Agricultural robot manipulator, Kinematics and workspace analysis, Manipulability measures

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۱۵-۱۰۱

تحلیل فضای کاری و سینماتیک بازوی روبات جابه‌جاکننده محصولات در مزرعه

سید ایمان شریعتی[1]، محمدحسین آق خانی[2*]، محمودرضا گلزاریان[3]، علی‌اکبر اکبری[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲

چکیده

علی‌رغم توسعه روزافزون استفاده از روبات‌ها در فرآیندهای مختلف، استفاده از بازوهای مکانیکی ماهر در عملیات زراعی بسیار محدود می‌باشد. در این مقاله تحلیل فضای کاری و سینماتیک یک روبات ۴ درجه آزادی با سه پیکربندی متفاوت برای انجام یک عملیات زراعی در محیط مزرعه مورد بررسی واقع شده است. محاسبات اولیه براساس روش‌های تحلیلی (هندسی) برای طراحی بازو انجام شده و سینماتیک آن در فضای نرم‌افزارهای Solidworks و Matlab با سه پیکربندی متفاوت در قالب دو آزمون شبیه‌سازی شده‌است. تعریف مسیر حرکت در فضای مفصلی براساس نقاط ابتدا و انتهای مسیر و یک چندجمله‌ای درجه ۵ انجام پذیرفت. با مقایسه شاخص‌هایی مانند تحلیل سرعت مجری نهایی، شاخص فضای کاری و معیار چالاکی پیکربندی مناسب از میان ۳ نوع پیکربندی مورد بررسی، انتخاب گردید. این انتخاب با نتیجه تحقیقاتی که محققین روی بهترین ساختار سه مفصل اول روبات مشهور پیوما انجام داده‌اند، سازگار بود.

واژه‌های کلیدی: بازوی روبات در کشاورزی، تحلیل سینماتیکی، شاخص فضای کاری و چالاکی

مقدمه

روبات‌ها برای جابه‌جایی مواد مختلف در بخش‌های صنعتی مدت‌ها است استفاده می‌شوند اما طی سال‌های اخیر رشد فناوری‌های روبات‌ها به‌خصوص سطح هوشمندی آن‌ها ارتقای قابل‌ملاحظه‌ای یافته است. در این راستا استفاده از ظرفیت روبات‌ها در بخش کشاورزی برای افزایش کارایی و اثربخشی روزبه‌روز در حال افزایش است. در این ارتباط دانشمندان و محققان زیادی نمونه‌های مختلفی از روبات‌ها را پیشنهاد داده‌اند و از آن‌جا که روبات ها در بخش کشاورزی با متغیرهای متعدد محیطی مواجه می‌باشند لزوم مناسب‌سازی پیکربندی‌های بازوهای مکانیکی برای انجام عملیات کشاورزی از موضوعات دارای اولویت است. بر اساس دسته‌بندی‌های انجام شده در منابع روباتیک، دو گروه اصلی در ارتباط با فعالیت‌های کشاورزی تعریف شده‌اند که عبارتند از بازوهای مکانیکی ماهر[5] و روبات‌های سیار چرخ‌دار[6]. تجربیات پژوهشی محدودی در این بخش در داخل کشور موجود است که عمده آن ها نیز در ارتباط با روبات‌های سیار چرخ‌دار انجام شده و عملا ظرفیت استفاده از بازوهای مکانیکی ماهر همچنان اندک‌شمار است. البته استفاده از سیستم‌های پردازش تصویر در روبات‌ها، دارای نمونه کارهای پژوهشی در داخل کشور می‌باشد که از آن جمله می‌توان الگوریتم‌های بینایی ماشین برای برداشت محصولاتی مانند فلفل دلمه‌ای اشاره کرد (Moghimi, Aghkhani, & Golzarian, 2015)؛ اما تجربیات محققین در زمینه طراحی و ساخت روبات‌های کشاورزی از دهه ۸۰ میلادی آغاز شده است. نمونه این تجربیات روباتی است که محققین ژاپنی برای حمل و نقل و جابه‌جایی محصولات و مواد سنگین در مزرعه مانند هندوانه، طالبی، کلم و غیره انجام داده‌اند. از آن‌جا که برداشت این محصولات

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: aghkhani@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2020.39236

5- Manipulator robot
6- Wheeled Mobile Robots (WMR)

خسته‌کننده و زمان‌بر می‌باشند، نیروی کار بیشتری می‌طلبد. آخرین نمونه روبات برداشت مواد سنگین در مزرعه توسط یک گروه تحقیقاتی در دانشگاه کیوتو ژاپن با یک ساختار روبات موازی طراحی و ساخته شده است. این روبات ۴ درجه آزادی دارد و قادر است به‌طور متوسط هر هندوانه را در مدت ۴۰ ثانیه برداشت نماید (Sakai & Iida, 2000; Sakai, Iida, & Osuka, 2008; Sakai, Iida, & Umeda, 2002). از آن‌جا که روبات‌ها در شرایط کنترل‌شده عملکرد بهتری خواهند داشت، استفاده از آن‌ها در گلخانه‌ها متداول‌تر است. به‌عنوان نمونه روبات ۹ درجه آزادی با ساختاری دارای حرکت اضافی[1] برای برداشت محصولات درختچه‌ای در گلخانه، نمونه یک بازو با زنجیره سینماتکی باز است که توسط جرج بور[2] در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است. این بازو در واقع یک روبات با قابلیت انجام چندین عملیات مختلف است. این روبات به دلیل آن‌که درجه آزادی آن از درجه آزادی مورد نیاز برای انجام کار مورد نظر بیشتر است، قادر خواهد بود مانور بسیار بالایی در عبور از موانع داشته باشد. هرچند حل معادلات سینماتیکی آن مشکل‌تر خواهد بود (Baur & Pfaff, 2012)؛ اما ساختارهای ساده‌تر بازوها مانند روبات‌های کشت نشاء در فضاهای گلخانه‌ای هم مورد استفاده می‌باشند. این بازوها با ۳ یا ۴ درجه آزادی مشابه روبات‌های مونتاژکار صنعتی می‌توانند عملیات جابه‌جایی نشاها در سینی‌های گلخانه را به سرعت انجام دهند. معمولا این مدل بازوها روی بسترهای متحرک نبوده و در یک محل ثابت مستقر می‌شوند و سینی‌های نشاء از مقابل آن‌ها عبور می‌کنند (Belforte, 2006). نمونه دیگر روبات برداشت مرکبات است که فرآیند طراحی و نحوه انتخاب پیکربندی مناسب آن در مقاله‌ای در سال ۲۰۰۷ در کنفرانس ASBAE مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله شاخص‌هایی به‌عنوان ضوابط عملکرد ماهرانه نوع پیکربندی با توجه به مقادیر نقاط تکین ماتریس ژاکوبین تعیین می‌شوند. بعد از انتخاب نوع این پیکربندی، فاکتورهای دیگر مانند سرعت، بارگذاری و دقت را می‌توان از ویژگی‌های نوع کار مورد نظر به‌دست آورد (Sivaraman, 2007). این محقق در مقاله‌ای دیگر به نحوه طراحی یک بازوی مکانیکی روبات برای کاربردهای کشاورزی با استفاده از مدل‌سازی ساختار سینماتیکی در Matlab و Robotect پرداخته است (Sivaraman, 2006). نمونه دیگر از این بازوهای مکانیکی، روبات برداشت گوجه‌فرنگی است. این نمونه یک بازوی ۶ درجه آزادی و مجهز به یک سیستم مجری نهایی مکشی بود و در سال ۲۰۰۸ در آزمایشگاه تخصصی سیستم‌های هوشمند کشاورزی دانشگاهی در چین ساخته شد که در کنفرانسی در همان سال ارائه گردید (Li, Liu, Li, & Li, 2008; Monta, Kondo, & Ting, 1998). در رابطه با روبات‌های موازی نمونه‌های مختلفی در مراجع علمی و آزمایشگاهی تعریف شده است. روبات‌های موازی از یک بخش ثابت، حداقل دو زنجیره سینماتیکی مستقل و یک صفحه متحرک به‌عنوان مجری نهایی تشکیل می‌شوند. تعداد زنجیره‌های سینماتیکی برابر تعداد درجات آزادی خواهد بود. در این میان روبات‌های دلتا که کاربرد وسیعی در خطوط بسته‌بندی و جابه‌جایی مواد دارند به‌صورت خاص معرفی شده‌اند. در کل ساختار روبات‌های موازی برای کاربردهایی مناسب است که نیازمند سرعت بالا در فضای کاری محدود است (Merlet, 2006).

مواد و روش‌ها

این مقاله برای انجام بخشی از عملیات زراعی در محیط مزرعه، یک بازوی مکانیکی ماهر که هیچ حلقه بسته‌ای در آن وجود ندارد و یک زنجیره سینماتیکی باز با ۴ درجه آزادی است را پیشنهاد می‌نماید و به بررسی فضای کاری و تحلیل سینماتیکی سه نوع پیکربندی مشابه می‌پردازد. در ادامه با مدل‌سازی سینماتیکی در قالب ۲ آزمون در محیط نرم‌افزار متلب، پیکربندی منتخب ارائه می‌گردد. این بازوی مکانیکی با طراحی و نصب مجری نهایی های گوناگون قادر به انجام کارهای مختلفی است و آن‌چه در این پروژه مورد نظر است بارگیری و تخلیه مواد و محصولات در مزرعه به‌عنوان یک نیروی کمکی برای کشاورز است.

نوع کار یا وظیفه بازوی مکانیکی ماهر

برای طراحی و تحلیل یک بازوی مکانیکی در گام اول باید نوع کار و وظیفه‌ای که قرار است بازو انجام دهد مشخص گردد. در این مسئله قرار است تریلری حاوی بسته‌های علوفه را در مکانی مناسب تخلیه یا بارگیری گردد. یک بازوی مکانیکی هوشمند که قابلیت اتصال به تراکتور دارد می‌تواند این عملیات را در کمترین زمان بدون دخالت نیروی کارگری به انجام رساند. این عملیات نیازمند نیروی کارگری و صرف انرژی زیاد است. در مسئله تعریف شده کارگران نیازمند این هستند که جعبه‌های ۱۰ کیلوگرمی را در یک فاصله ۳ تا ۴ متر در ارتفاع ۱ تا ۲ متر جابه‌جا نمایند و این موضوع به گشتاور مفصلی زیاد نیاز خواهد داشت. فرآیند این عملیات شامل تشخیص موقعیت هدف برای قرارگیری مجری نهایی در روی هدف و در ادامه محاسبه جهت‌گیری مورد نیاز برای برداشتن محصول خواهد بود. اهداف مورد نظر در این پروژه متشکل از چند حجم مکعب براساس ابعاد شکل ۱ است.

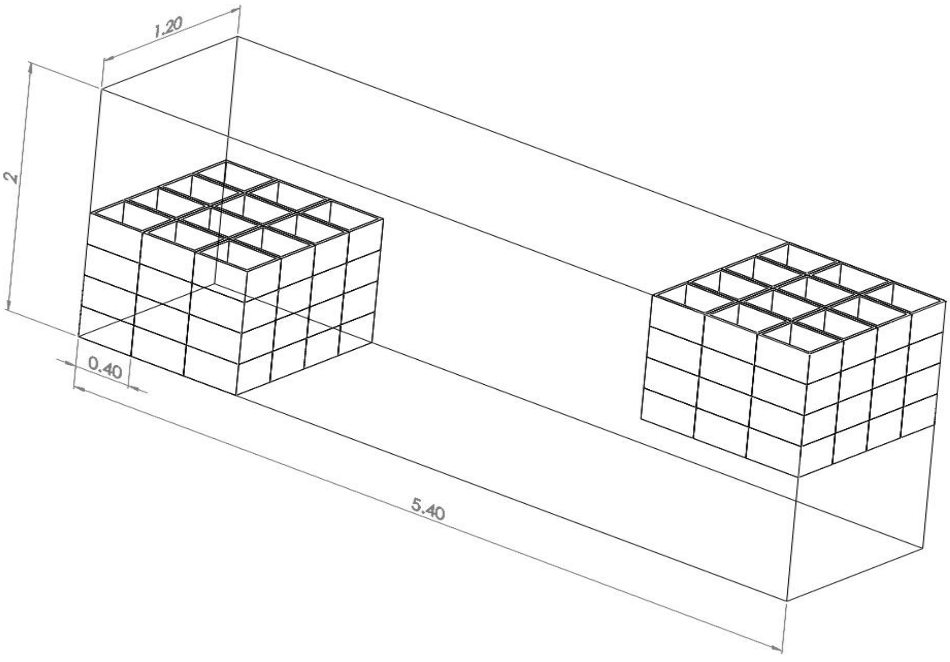
1- Redundant
2- Joerg Baur



شکل ۱– نمونه بسته‌ها با وزن تقریبی ۱۰ کیلوگرم و ابعاد ۳۰*۴۰*۲۵

Fig.1. Sample packages Boxes with approximate weight of 10 kg and 30*40*25 cm

از آن‌جا که فضای کاری مورد نیاز روبات وابسته به مقیاس کاری است که باید انجام شود، لذا فضای عملیات روبات در قالب شکل ۲ مدل شده است. ۴۸ بسته علوفه انتخاب شده‌اند که در چهار ردیف سه‌تایی به‌صورت منظم در موقعیت مبدا (سمت چپ تصویر) قرار گرفته اند و قرار است روبات مورد نظر این بسته‌ها را تک به تک برداشته و به موقعیت هدف (تریلر یا هر وسیله انتقال بار) (سمت راست تصویر) به همان صورت منظم منتقل نماید. چیدمان منظم بسته‌ها به‌واسطه این است که در این مرحله از پروژه صرفا بررسی سینماتیک بازو در حداقل فضای کاری مورد نظر بود. برای شروع عملیات، پایه اصلی روبات بر روی سکویی متصل به مالبند تراکتور قرار گرفته و روی زمین تثبیت می‌شود.



شکل ۲– فضای کاری پیش‌بینی‌شده برای عملیات

Fig.2. Predicted workspace for operation

طراحی و تحلیل مدل سینماتیکی

بازوهای مکانیکی مجموعه‌ای از اتصالات[1] هستند که به کمک مفاصل به هم متصل شده‌اند. این بازوها را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی به دو گروه تقسیم نمود: بازوهای سری[2] که هیچ حلقه بسته‌ای در آن‌ها وجود ندارد و یک زنجیره سینماتیکی باز هستند. فضای

1- Links

2- Serial Manipulator

کاری زیاد، تنوع بالا در انجام کار و ظرفیت حمل بار کمی دارند. بازوهای موازی[1] یک زنجیره سینماتیکی بسته هستند و قادر به حرکات سریع و دقیق می‌باشند. برای آشنایی بیشتر می‌توان به مراجع مربوط مراجعه نمود (Merlet, 2006). مفصل‌ها به دو صورت مفاصل لغزشی (حرکت خطی) و مفاصل چرخشی[2] (حرکت دورانی) در یک بازو به‌کار گرفته می‌شوند. بدیهی است پیکربندی مناسب خواهد بود که بتواند در فضای کاری تعریف شده کار مورد نظر را به‌درستی انجام دهد. از میان مکانیزم‌های مختلف، طرحی با چهار درجه آزادی دورانی برای بازوی مکانیکی انتخاب شد (RRRR). برای شروع کار موقعیت مجری نهایی و سپس جهت‌گیری آن به کمک معادله سینماتیک مستقیم روبات بررسی گردید. این بازو شامل ساختار سریال با ۴ رابط اصلی و ۴ مفصل چرخشی است. به عبارت دیگر به‌عنوان پیش‌فرض اولیه یک پیکربندی ۴ درجه آزادی خواهیم داشت، که هریک از مفاصل صرفا یک درجه آزادی دارد. برای توصیف فضای کاری مجری نهایی، در هر یک از مفاصل یک دستگاه مختصات پیش‌بینی‌شده و به کمک ماتریس‌های تبدیل، مختصات مجری نهایی به فضای دستگاه مختصات مرجع منتقل گردید. معادلات سینماتیکی حاکم بر آن نیز بر اساس ساختار هندسی پیکربندی مورد نظر حل شد (شکل ۳).

معادلات سینماتیک مستقیم

در بازوهای مکانیکی روبات برای رسیدن به نقطه هدف، سه درجه آزادی برای موقعیت و سه درجه آزادی برای جهت‌گیری مطرح است. در این پروژه مجری نهایی بازو با سه درجه آزادی در موقعیت هدف قرار می‌گیرد و با یک جهت‌گیری امکان فعال شدن چنگک[3] برای گرفتن بسته فراهم می گردد و با توجه به مکانیزم تطبیق ثقلی و نحوه عملکرد نفوذی چنگک برای برداشتن بسته علوفه، دو درجه آزادی دیگر که برای تکمیل جهت‌گیری گرفتن بسته، مورد نیاز خواهد بود مرتفع می‌گردد. معادله سینماتیک مستقیم برای انتقال مختصات مجری نهایی به دستگاه مرجع تعریف می‌شود. برای حل این معادله نیازمند تعریف ۶ پارامتر برای هریک از مفاصل خواهیم بود. اما با استفاده از ماتریس تبدیل دناویت هارتنبرگ (D-H)[4] با کمک ۴ پارامتر این تبدیل به‌صورت ساده‌تری حل شد. فرمول تبدیل طبق ماتریس رابطه (۱) خواهد بود. ماتریس‌های تبدیل سینماتیک مستقیم برای هریک از مفاصل بازو در ۳ پیکربندی مورد آزمون طبق پارامترهای جدول ۱ محاسبه شده است. ماتریس تبدیل نهایی نیز از ضرب این ماتریس‌ها طبق رابطه (۲) و (۳) به‌دست آمده است. برای انتخاب این ۳ پیکربندی، رعایت اصول دناویت هارتنبرگ و شرایط استقرار بازوی روبات در انتهای تراکتور در نظر گرفته شده است (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2004).

براین اساس توالی مفصل‌های چرخشی مشابه بوده و زاویه بین محورهای چرخش نیز بدون تغییر خواهد بود. آن‌چه در این بخش برای تمایز بین این سه پیکربندی لحاظ شده است طول رابطها است. در رابطه (۳) پارامترهای p، موقعیت مجری نهایی و پارامترهای r در ستون سوم، چرخش دستگاه متصل به مجری نهایی را نشان می‌دهد (Gan, Yu, He, Wang, & Sun, 2014).

ماتریس تبدیل نهایی که موقعیت مکانی انتهای مجری نهایی را برای سه پیکربندی مورد نظر نشان می‌دهد به ازای متغیرهای مفصلی مجری نهایی که هریک از پیکربندی‌ها در نقطه مقصد خواهند داشت از رابطه (۴) به‌دست خواهد آمد. مختصات مجری نهایی در ابتدا و انتهای مسیر به‌ترتیب برابر با مقادیر $P_1 = [1.25 \quad -2.16 \quad 0.86]$، $P_2 = [0.866 \quad 1.5 \quad 2]$ خواهد بود.

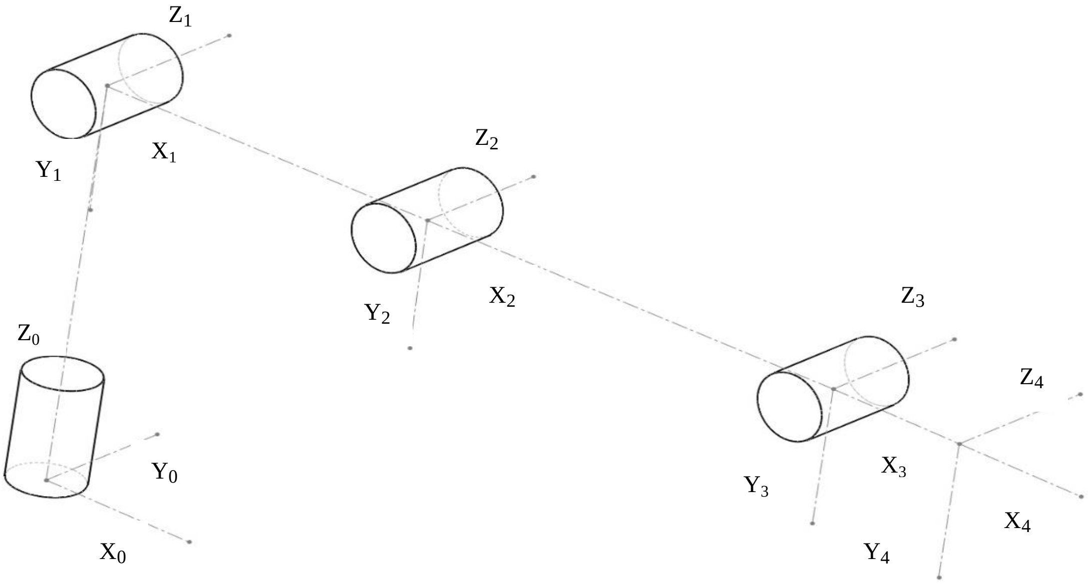
شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب

برای مقایسه و آزمون این سه پیکربندی، دو آزمون در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. در هر دو آزمون، هرکدام از پیکربندی‌ها براساس یکسری متغیر مفصلی مسیری را از نقطه مبداء به نقطه مقصد طی خواهند نمود با این تفاوت که در آزمون دوم مسیر با یک توده درخت به‌عنوان مانع روبه‌رو است. موقعیت نقطه اول و نقطه دوم بر حسب متر با مختصات محاسبه شده در مرحله قبل یکسان است که صحت محاسبات و معادلات سینماتیک انجام شده را نشان می‌دهد. نمونه این صحت‌سنجی‌ها در سایر مقالات هم دیده می‌شود (Li *et al.*, 2008).

برای مدل‌سازی در محیط متلب، مسیر حرکت بازو براساس روش فضای مفصلی، بین دو نقطه مفروض با متغیرهای مفصلی q_1 (متغیرهای مفصلی موقعیت اولیه محصول) و q_2 (موقعیت‌های هدف) در فضای کاری طبق یک تابع درجه ۵ $q(t)$، در یک بازه زمانی ۴ ثانیه و با گام‌های زمانی ۰/۱ ثانیه با ۴۱ مقدار برای q به‌دست آمد و شبیه‌سازی شد. این تابع در آزمون اول با فرض صفر بودن سرعت و شتاب مجری نهایی در نقاط ابتدا و انتهای مسیر به‌دست آمده است (شکل ۴) (Korayem, Ahmadi, Jaafari, Jamali, & Kiomarsi, 2008).

در آزمون دوم مجری نهایی همان عملیات آزمون اول را انجام داد با این تفاوت که باید از مانع پیش‌بینی شده در مسیر عبور می‌کرد. این مانع توده‌ای از شاخه‌های درخت بود که مختصات فضای تحت پوشش آن‌ها براساس بازخورد دوربین متصل به پایه اصلی روبات در دستگاه مختصات مرجع مشخص شده بود. برای عبور از این مانع براساس روش مفصلی از نقاط بینابینی استفاده شد.

1- Parallel Manipulator
2- Revolute Joint and Prismatic Joint
3- Gripper
4- Denavit–Hartenberg transformation matrix



شکل ۳- ساختار پیکربندی اصلی

Fig.3. Main selected configuration

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & -\cos(\alpha).\sin(\Theta) & \sin(\alpha).\sin(\Theta) & a.\cos(\Theta) \\ \sin(\Theta) & \cos(\alpha).\cos(\Theta) & -\sin(\alpha).\cos(\Theta) & a.\sin(\Theta) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$T_0^4 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 \quad (۲)$$

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned}
T_0^4 &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
r_{11} &= C_{\theta1}C_{\theta2}C_{\theta3}C_{\theta4} - C_{\theta1}C_{\theta4}S_{\theta2}S_{\theta3} - C_{\theta1}C_{\theta2}S_{\theta3}S_{\theta4} - C_{\theta1}C_{\theta3}S_{\theta2}S_{\theta4} \\
r_{21} &= S_{\theta1}C_{\theta4}C_{\theta2}C_{\theta3} - C_{\theta4}S_{\theta1}S_{\theta2}S_{\theta3} - C_{\theta2}S_{\theta1}S_{\theta3}S_{\theta4} - C_{\theta3}S_{\theta1}S_{\theta2}S_{\theta4} \\
r_{31} &= C_{\theta4}(S_{\theta2}C_{\theta3+}S_{\theta3}C_{\theta2}) + S_{\theta4}(-S_{\theta3}S_{\theta2} + C_{\theta2}C_{\theta3}) \\
r_{12} &= -S_{\theta4}C_{\theta1}C_{\theta2}C_{\theta3} + C_{\theta1}S_{\theta2}S_{\theta3}S_{\theta4} - C_{\theta1}C_{\theta2}C_{\theta4}S_{\theta3} - C_{\theta1}C_{\theta3}C_{\theta4}S_{\theta2} \\
r_{22} &= -C_{\theta2}C_{\theta3}S_{\theta1}S_{\theta4} + C_{\theta1}S_{\theta2}S_{\theta3}S_{\theta4} - C_{\theta2}C_{\theta4}S_{\theta1}S_{\theta3} - C_{\theta3}C_{\theta4}S_{\theta1}S_{\theta2} \\
r_{32} &= -S_{\theta4}(S_{\theta2}C_{\theta3+}S_{\theta3}C_{\theta2}) + C_{\theta4}(-S_{\theta3}S_{\theta2} + C_{\theta2}C_{\theta3}) \\
r_{13} &= S_{\theta4} \\
r_{23} &= -C_{\theta1} \\
r_{33} &= 0 \\
p_x &= C_{\theta1}(a4C_{\theta2\theta3\theta4} + a3C_{\theta2\theta3} + a2C_{\theta2}) \\
p_y &= S_{\theta1}(a4C_{\theta2\theta3\theta4} + a3C_{\theta2\theta3} + a2C_{\theta2}) \\
p_z &= a4S_{\theta2\theta3\theta4} + a3S_{\theta2\theta3} + a2S_{\theta2} + d1
\end{aligned} \quad (۴)$$

جدول ۱- پارامترهای دیناویت هارتنبرگ برای پیکربندی‌های انتخاب‌شده بازوی روبات

Table 1- Denavit-Hartenberg Parameters for robot configurations

Type 1

Link (i)	Link length a (m)	Link offset D(m)	Twist angle α (deg)	Joint angle θ (deg)	Range
1	0	0.5	90	θ1	(-90)-90
2	2	0	0	θ2	0-90
3	1	0	0	θ3	0-180
4	0.5	0	0	θ4	0-180

Type 2

Link (i)	Link length a (m)	Link offset D(m)	Twist angle α (deg)	Joint angle θ (deg)	Range
1	0	0.5	90	θ1	(-90)-90
2	1	0	0	θ2	0-90
3	2	0	0	θ3	0-180
4	0.5	0	0	θ4	0-180

Type 3

Link (i)	Link length a (m)	Link offset D(m)	Twist angle α (deg)	Joint angle θ (deg)	Range
1	0	1	90	θ1	(-90)-90
2	1	0	0	θ2	0-90
3	1	0	0	θ3	0-180
4	0.5	0	0	θ4	0-180

جدول ۲- مختصات نقاط اصلی مسیر و مقادیر متغیرهای مفصلی آن‌ها در هر دو آزمون برای پیکربندی‌های انتخاب شده بازوی روبات

Table 2- Main Point Poses of Path and Joint Variables for robot configurations

مختصات Coordinates(m)	**نقطه میانی Middle point**	**نقطه مقصد Target Point**	**نقطه مبداء Start Point**
	[0.866 1.5 2]	[2.031 0.021 0.98]	[1.25 -2.165 0.866]
متغیرهای مفصلی Joint Variables	آزمون دوم Test 2	آزمون اول و آزمون دوم Test 1 / 2	
پیکربندی نوع اول Config.type 1	[0.026 0.83 -1.39 -1.34]	[1.04 1.326 -1.3 -1.09]	[-1.05 0.67 -π/3 -1.21]
پیکربندی نوع دوم Config.type 2	[0 1.57 -1.58 -1.497]	[π/3 π/2 -π/3 -2π/3]	[-π/3 π/3 -π/3 -π/2]
پیکربندی نوع سوم Config.type 3	[0.01 0.738 -1.097 0.397]	[π/3 1.25 -0.97 -0.712]	[-1.05 0.06 -0.188 0]

در این آزمون یک نقطه بینابینی در نزدیکی توده موانع پیش‌بینی شد که سرعت و شتاب مجری نهایی در آن صفر نبوده و معادله مسیر بر همین اساس محاسبه گردید. مسیر حرکت بازوی روبات براساس پیکربندی نوع اول در این آزمون در شکل ۵ به‌عنوان نمونه نشان داده شده است. جدول ۲ مقادیر متغیرهای مفصلی پیکربندی‌ها را در دو آزمون نشان می‌دهد.

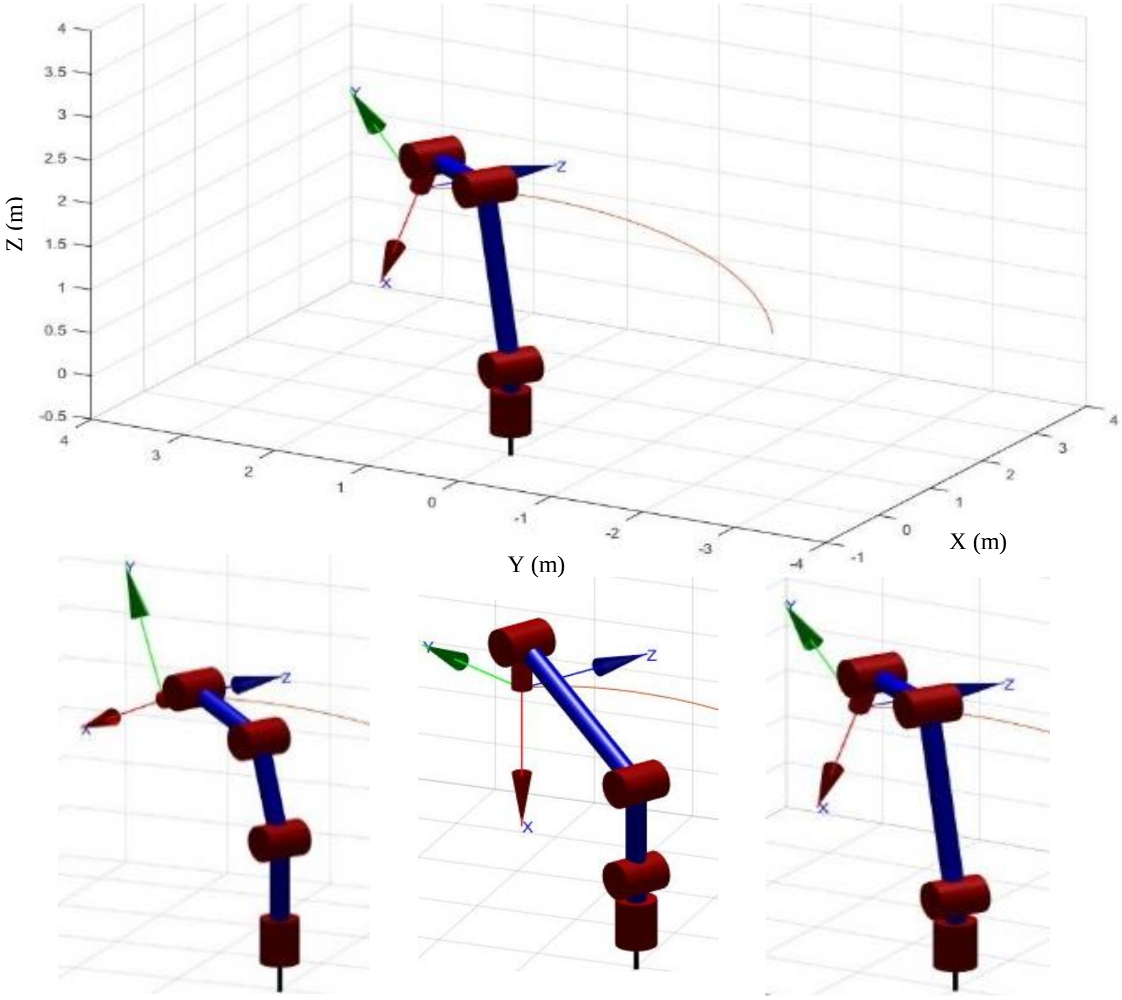
سینماتیک سرعت و ژاکوبین بازو

روبات از نقطه تعریف‌شده $P_1(X_1,Y_1,Z_1)$ به نقطه $P_2(X_2,Y_2,Z_2)$ حرکت می‌نماید. میزان تغییرات هر یک از مولفه‌های مختصاتی در واحد زمان، میزان سرعت مجری نهایی را در راستای مختصاتی مزبور مشخص می‌نماید. ماتریس ژاکوبین در واقع ماتریس مولفه‌های سرعت مجری نهایی را به ماتریس سرعت متغیرهای مفصلی مرتبط می‌سازد. درواقع یک نگاشت از سرعت‌های فضای مفصلی به سرعت‌های فضای کاری (فضای کارتزین) است. روابط (۵

و ۶). در این مسئله n=4 است و سرعت خطی و زاویه‌ای مجری نهایی براین اساس تعیین می‌شود (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2004).

$$\dot{X}_{6\times1} = J_{6\times n}.\dot{q}_{n\times1} \quad (۵)$$

$$\dot{X}_{6\times1} = J_{6\times4}.\dot{q}_{4\times1} \quad (۶)$$



شکل ٤- مدل‌سازی بازوی روبات در دو نقطه مبدا و مقصد از فضای کاری در آزمون اول، پیکربندی نوع ۱ (راست)، پیکربندی نوع ۲ (وسط) و پیکربندی نوع ۳ (چپ)

Fig.4. Manipulator simulation for two positions of workspace, type1 (right), type2 (middle), type3 (left)

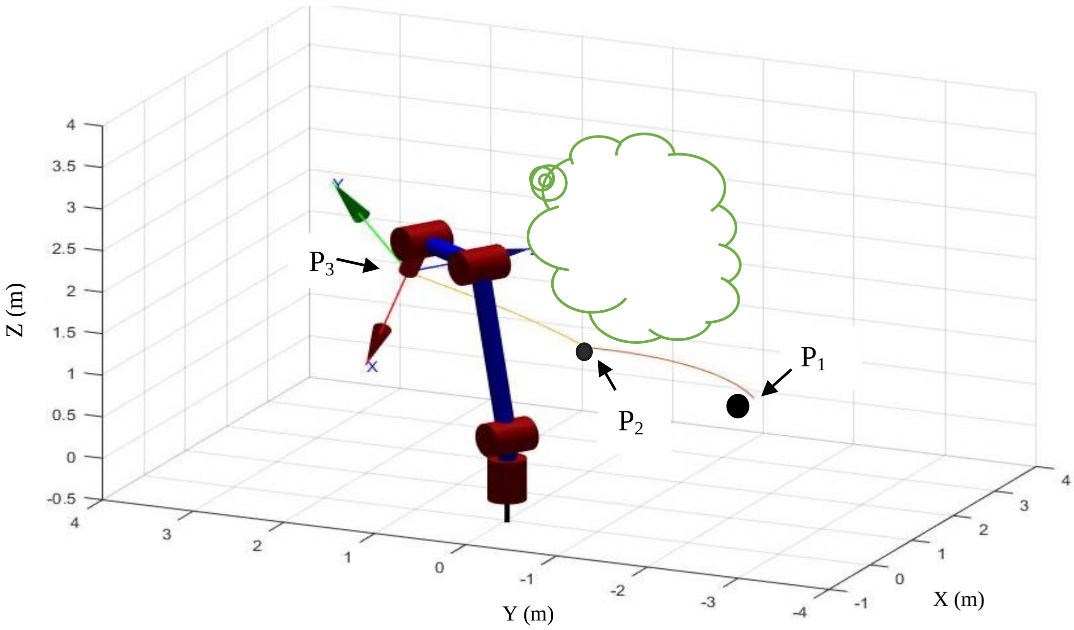
$$J = [J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4]_{6\times4} \quad (۷)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} Z_0 \times (O_4 - O_0) \\ Z_0 \end{bmatrix} J_2 = \begin{bmatrix} Z_1 \times (O_4 - O_1) \\ Z_1 \end{bmatrix} J_3 = \begin{bmatrix} Z_2 \times (O_4 - O_2) \\ Z_2 \end{bmatrix} J_4 = \begin{bmatrix} Z_3 \times (O_4 - O_3) \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$O_0 = [0 \quad 0 \quad 0] \quad (۹)$$

$$O_1 = [0 \quad 0 \quad d_1] \quad (۱۰)$$

$$O_2 = [a_2 \times \cos(\theta_2) \times \cos(\theta_1) \quad a_2 \times \cos(\theta_2) \times \sin(\theta_1) \quad a_2 \times \sin(\theta_1) + d_1] \quad (۱۱)$$



شکل ۵- مدل‌سازی پیکربندی نوع اول بازو در مسیر عبور از مانع در آزمون دوم (متلب)

Fig.5. Manipulator type 1 simulation for a trajectory with the obstacle in test 2 (Matlab)

ماتریس ژاکوبین به ازای هریک از متغیرهای مفصلی به‌صورت دستی و مدل‌سازی در نرم‌افزار متلب محاسبه شده است. در روباتیک اگر بتوان ماتریس ژاکوبین را در موقعیت‌های مختلف به‌صورت خوش‌رفتار (کنترل‌پذیر) طراحی کرد، روبات مورد نظر از نظر انتقال خطا از فضای مفصلی به فضای کارتزین در شرایط خوبی قرار خواهد گرفت. ماتریس ژاکوبین براساس روابط (۷) تا (۱۶) در قالب محاسبات دستی به‌دست آمد. در این روابط محور O مربوط به اولین سه عضو چهارمین ستون و محور Z اولین سه عضو سومین ستون مربوط به ماتریس تبدیل دستگاه مختصات مفصل مورد نظر است (Spong, 2004). صحت محاسبه ماتریس ژاکوبین با مقایسه خروجی محاسبات دستی و سرعت مجری نهایی مدل شبیه‌سازی شده در متلب، قابل تایید است. نمودارهای سرعت حرکت خطی مجری نهایی هر سه پیکربندی برای طی این مسیر در زمان ۴ ثانیه طبق آزمون دوم در شکل۶ آمده است. نمودار سرعت در آزمون اول صرفا دارای یک نقطه حداکثری برای سه نوع بازو خواهد بود و مشابه بخش اول نمودار شکل ۶ می‌باشد.

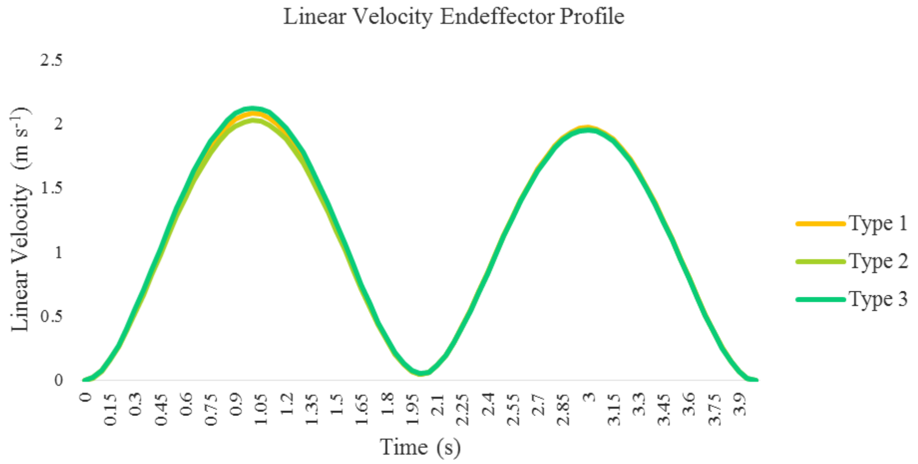
$$O_3 = \begin{bmatrix} a_3\cos(\theta_1)\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - a_3\cos(\theta_1)\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) + a_2\cos(\theta_2)cos(\theta_1) \\ a_3\cos(\theta_2)\sin(\theta_1)\cos(\theta_3) - a_3\sin(\theta_3)\sin(\theta_1)\sin(\theta_2) + a_2\cos(\theta_2)sin(\theta_1) \\ a_3\sin(\theta_2)\cos(\theta_3) + a_3\sin(\theta_3)\cos(\theta_2) + a_2\sin(\theta_2) + d_1 \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$$O_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)(a_4\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + a_2\cos(\theta_2)) \\ \sin(\theta_1)(a_4\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4) + a_3\cos(\theta_2+\theta_3) + a_2\cos(\theta_2)) \\ a_4\sin(\theta_2+\theta_3+\theta_4) + a_3\sin(\theta_2+\theta_3) + a_2\sin(\theta_2) + d_1 \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

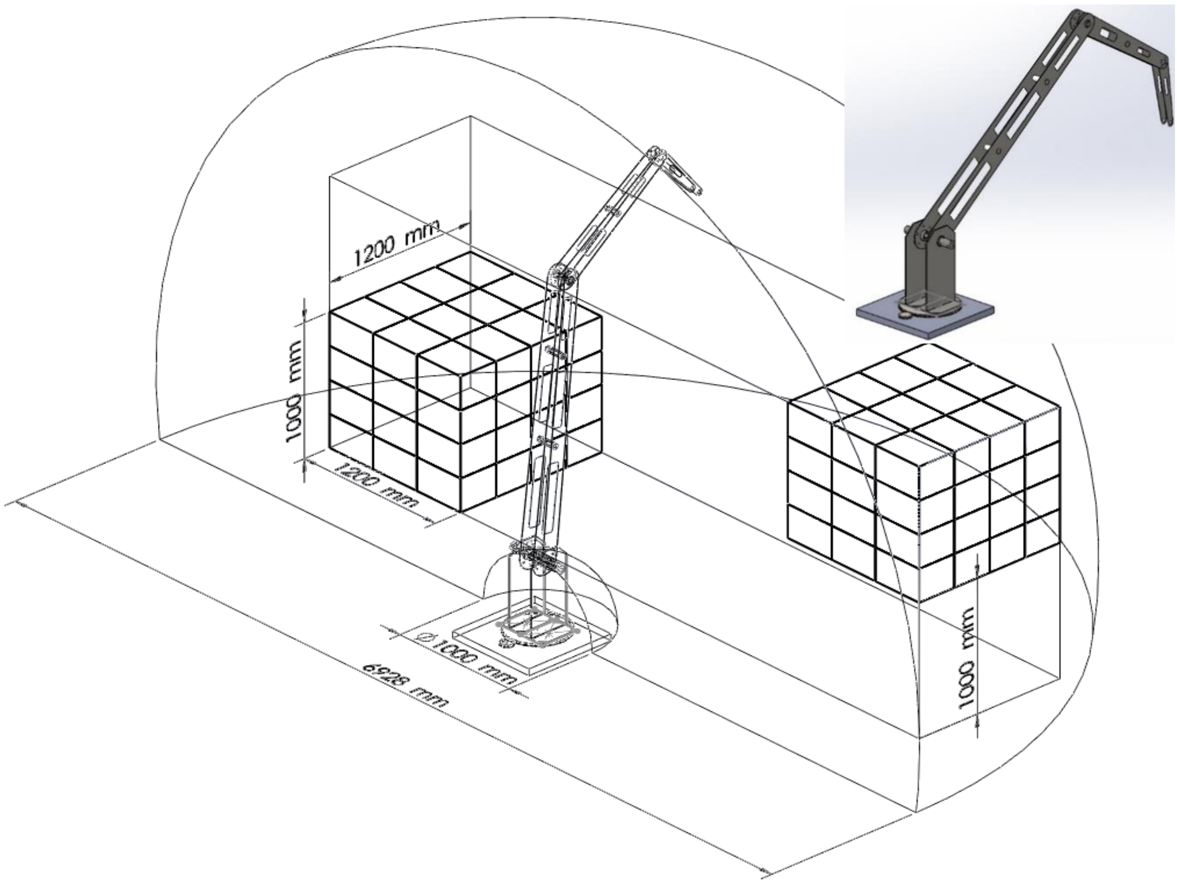
$$Z_0 = [0 \quad 0 \quad 0] \quad (۱۴)$$

$$Z_1 = [\sin(\theta_1) \quad -\cos(\theta_1) \quad 0] \quad (۱۵)$$

$$Z_3 = Z_2 = Z_1 \quad (۱۶)$$



شکل ٦- نمودار سرعت خطی مجری نهایی نقاط مختلف مسیر در آزمون ۲ برای هرسه نوع پیکربندی روبات
Fig.6. Linear velocity Endeffector in path points-Test 2 for 3 Types profile (Matlab)



شکل ۷- فضای کاری شبیه‌سازی شده برای بازوی روبات
Fig.7. Simulated workspace for manipulator

تحلیل فضای کاری روبات[1]

بررسی شاخص فضای کاری روبات

فضای کاری براساس پیکربندی انتخاب شده برای روبات در قالب شکل ۷ با ۲ ویژگی شبیه‌سازی شده است. اول، دارای مدل هندسی قاعده‌مند مانند کره، مکعب، منشور و غیره باشد. دوم، دارای دامنه حرکتی کامل برای مجری نهایی با حداقل حجم باشد (Gen, *et al.*, 2014).

در جدول ۱ دامنه تغییرات متغیرهای مفصلی به گونه‌ای تعریف شده که فضای کاری روبات مورد نظر کمی بیشتر از ۱/۴ حجم کره پیش‌بینی شود. روبات باید بتواند در راستاهای مختلف یک مقدار مطلوب از پیش تعیین‌شده را پیمایش نماید. دستیابی به حداکثر فضای کاری با ثابت ماندن ابعاد روبات دارای اهمیت است. در این رابطه محققین پیشنهاداتی ارائه نموده‌اند.

$$V_N = \int_V dV / \frac{4}{3}\pi L^3$$

شاخص فضای کاری نرمالایزشده که در آن حجم فضای کار واقعی یک بازو به حجم عملیاتی ایده‌آل (کره) از رابطه (۱۷) که یک انتگرال حجمی است، نرمالایز می‌شود. بدیهی است این شاخص هر اندازه به عدد یک نزدیک‌تر باشد شرایط بهتری برای کار روبات فراهم خواهد بود (Sakai, Iida, & Osuka, 2008).

این بازو با دو حجم کره مواجه بود. یک کره به شعاع مجموعه طول رابطهای روبات که برای دو نوع پیکربندی اول برابر ۴ متر است (Vt) و یک کره به شعاع ۳/۵ متر که برابر مجموع طول رابطه‌ها با کسر رابط اول است (Va) که در کره اول محاط شده و صرفا در یک نقطه با کره اول مشترک است و در واقع فضای در دسترس[2] بازوی روبات یا حجم فضای کار واقعی بازوی روبات است. البته لازم به ذکر است ۱/۴ هر دو کره در فضای کار واقعی این پروژه مطرح خواهد بود. این مقدار برای پیکربندی نوع۱ و ۲ یکسان بوده و طبق روابط (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) محاسبه گردید و برای نوع ۳ متفاوت و طبق روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) محاسبه گردیده است.

$$Va = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3}(1 + 2 + 0.5)^3 \quad (۱۸)$$

$$Vt = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3}(0.5 + 1 + 2 + 0.5)^3 \quad (۱۹)$$

$$Vn = \frac{Va}{Vt} = 0.67 \quad (۲۰)$$

$$Va = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3}(1 + 1 + 0.5)^3 \quad (۲۱)$$

$$Vt = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3}(1 + 1 + 1 + 0.5)^3 \quad (۲۲)$$

$$Vn = \frac{Va}{Vt} = 0.36 \quad (۲۳)$$

$$Q_L = \frac{\sum l i}{\sqrt[3]{V}} \quad (۲۴)$$

$$Q_L = \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{4\pi}{3}(3.5^3)}} = 0.7 \quad (۲۵)$$

$$Q_L = \frac{3.5}{\sqrt[3]{\frac{4\pi}{3}(2.5^3)}} = 0.868 \quad (۲۶)$$

شاخص طولی سازه‌ای از نسبت مجموعه ابعاد رابطهای روبات به ریشه سوم حجم فضای کاری طبق رابطه (۲۴) به‌دست می‌آید. در آن V حجم فضای کاری پیمایش‌شده و l طول رابط روبات است. در نتیجه طرحی مناسب است که در آن بازو دارای مجموع طولی کوچک و در عین حال دارای حجم فضای کاری بزرگ باشد و هر اندازه این نسبت کمتر باشد این شاخص در وضعیت بهتری است. این شاخص برای بازوی‌های با پیکربندی متداول بند بند برابر ۰/۶۲، دکارتی برابر ۳ و اسکارا برابر ۱/۲ می‌باشد (Craig, 2005) برای پیکربندی نوع ۳ این مقدار طبق رابطه (۲۶) و برای پیکربندی نوع ۱ و ۲ طبق رابطه (۲۵) این شاخص به‌دست آمد.

بررسی شاخص چالاکی بازو

با توجه به این‌که بازوی مکانیکی ماهر در نقاط تکین یک یا چند درجه آزادی خود را از دست می‌دهد و عملکرد بازو تحت تاثیر این موضوع خواهد بود، لذا برای بررسی کمی این مسئله از معیاری‌که شاخص چالاکی بازو نامیده می‌شوند در هنگام طراحی استفاده می‌کنند. این معیار مهارت و چالاکی از رابطه (۲۷) به‌دست می‌آید (Yoshikawa, 1985).

$$w = \sqrt{\det(J(q)\,.J^T(q)} \quad (۲۷)$$

این شاخص میزان نزدیکی نقاط تکین به موقعیت فعلی بازو را نشان می‌دهد و در مقادیر بالا بیان‌گر آن است که بازو توانایی حرکات مساوی در تمام جهات را دارد و در مقادیرکم نزدیک شدن بازو به نقاط تکین را اعلام می‌کند. یک بازو مکانیکی خوب دارای نواحی بزرگی از فضای کاری با مقادیر بزرگ w خواهد بود. این شاخص براساس تحلیل سرعت بوده و وابستگی به پارامترهای سینماتیکی بازو مانند ژاکوبین دارد.

نتایج و بحث

مسئله جابه‌جایی بسته‌های علوفه در مزرعه به‌صورت زیر تشریح

1- Analysis of Manipulator Workspace
2- Reachable workspace

می‌گردد تا انجام عملیات به‌وسیله بازوی مدل شده، قابل مقایسه باشد. اگر کشاورز قرار باشد ۴۸ بسته علوفه به وزن حدودی ۱۰ کیلوگرم را به‌صورت دستی (کارگر انسانی) در فضای کاری مدل‌شده در شکل ۱۰ جابه‌جا نماید، زمان جابه‌جایی هر بسته در حالت رفت و برگشت در مسیر بدون مانع به‌صورت متوسط ۳۰ ثانیه خواهد بود که برای کل بسته‌ها ۲۴ دقیقه خواهد شد. با توجه به متوسط مسافت ۴ متر، سرعت حرکت در حدود ۰/۲۷ متربرثانیه خواهد شد و این درحالی است که برآیند سرعت خطی مجری نهایی بازوی روبات در آزمون اول ۱ متر بر ثانیه می‌باشدکه ۳/۷ برابر حالت کارگری است و جابه‌جایی کل بسته‌ها در حدود ۶/۵ دقیقه انجام خواهد شد. با ارتقای موتورها می‌توان این سرعت را افزایش داد.

ارزیابی نمودارهای سرعت مجری نهایی بازوی روبات

بررسی نمودار سرعت مجری نهایی در هر دو آزمون نشان می‌دهد تفاوت خاصی در اثر تغییر پیکربندی‌ها روی سرعت و شتاب مجری نهایی بازو نخواهیم داشت و نکته حائز اهمیت در آزمون دوم وجود نقطه بینابینی در کنار مانع موجود در مسیر است که سرعت بازو در آن به حداقل ممکن می‌رسد اما همان‌طور که قبلا اشاره شد صفر نمی‌شود (شکل ۶).

مقایسه شاخص‌های ارزیابی فضای کاری روبات و چالاکی بازو

در این بخش نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص‌ها، توجیه اولیه انتخاب ابعاد بازو را نشان داد. برای مقایسه بهتر این شاخص‌ها برای سه پیکربندی محاسبه و مقایسه شده است.

شاخص ارزیابی فضای کاری

در روش اول اگر بتوان طول رابط اول یا به عبارتی فاصله بین دو مفصل اول و دوم را که در دو صفحه متعامد باعث حرکت بازو می‌شوند را کم نمود، حجم پیمایش‌شده واقعی به حجم کره اصلی نزدیک‌تر شده و شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر می‌شود و این موضوع در شاخص پیکربندی نوع ۱ و ۲ دیده می‌شود. این موضوع عامل کاهش شاخص طولی سازه‌ای هم خواهد شد و در مجموع باعث بهبود شاخص فضای کاری روبات خواهد بود. بررسی شاخص طولی سازه‌ای در یک تحقیق بین ۱۶ گروه متنوع پیکربندی انجام شده و دامنه‌ای بین ۰/۸۲ تا ۳ برای مقادیر این شاخص حاصل شده است. بدیهی است مقدار ۰/۷ این شاخص که در این پروژه برای دو نوع پیکربندی ۱ و ۲ به‌دست‌آمده می‌توانند مناسب باشد (Kucuk & Bingul, 2006).

شاخص چالاکی بازوی مکانیکی

نمودار شکل‌های ۸ و ۹ حرکت بازوی مکانیکی در قالب هر سه پیکربندی را در هر یک از دو آزمون نشان می‌دهد. نقطه مبدا برای پیکربندی نوع ۳، به دلیل این‌که طول بازوی روبات در این حالت کمتر از دو نوع دیگر است به نقطه مرز فضای کاری نزدیک‌تر بوده و لذا شاخص مهارت و چالاکی کمتر است. در طول مسیر حرکت بین دو نقطه مبدا و مقصد، سینماتیک پیکربندی نوع اول شاخص چالاکی بهتری نسبت به دو نوع دیگر دارا است و در نتیجه مجری نهایی توانایی بهتری در انجام عملیات خواهد داشت. در آزمون دوم به دلیل وجود مانع و استفاده از نقطه بینابینی برای تصحیح مسیر حرکت بازو، این شاخص در ثانیه دوم در پیکربندی نوع ۱ و ۲ افت معنی‌داری می‌کند. بدیهی است برنامه‌ریزی مسیر باید به گونه‌ای تنظیم شود که بازوی روبات در فاصله مناسبی از مرکز فضای کاری، عملیات جابه‌جایی را انجام دهد تا شاخص چالاکی کاهش چشمگیر نداشته باشد. این موضوع در تحقیقی که در سال ۲۰۰۶ برای یک بازوی روبات برداشت مرکبات (Sivaraman &d Bruks,2006) و نیز در مقاله (Kucuk & Bingul, 2006) قابل مشاهده است.

براساس نمودارهای فوق، پیکربندی نوع اول نسبت به دو نوع دیگر مناسب‌تر خواهد بود و این موضوع طبق آنچه یوشیگاوا برای سه مفصل اول روبات پیوما[1] پیشنهاد داده است، یکی از بهترین موقعیت‌ها است. زیرا که سه مفصل اول این روبات مشابه روبات پوما است و نسبت بین رابط ۳ به رابط ۲ بازوی روبات در این پروژه ۰/۵ است و میزان تغییر زاویه مفصل هم کمتر از ۹۰ درجه است و براساس رابطه (۲۸) این موضوع، شاخص‌w را در حداکثر مقدار نگاه می‌دارد (Yoshikawa, 1985).

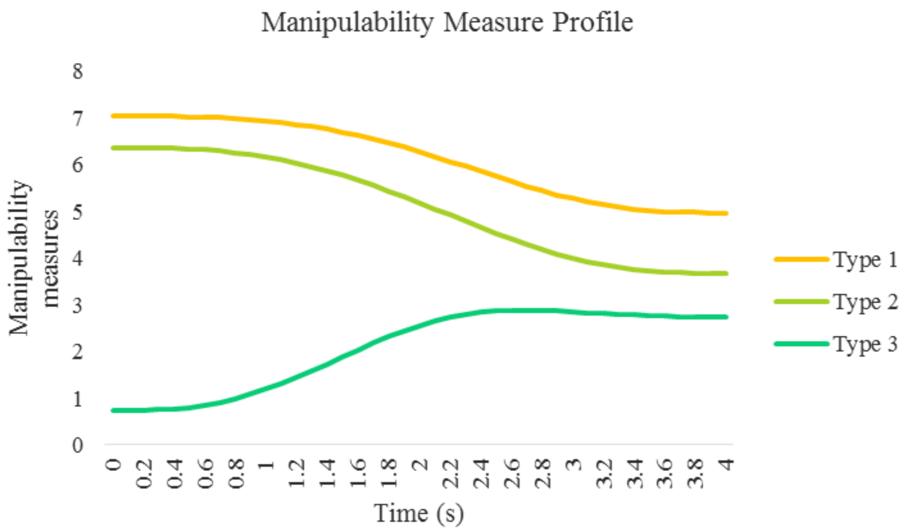
نتیجه‌گیری

یکی از نکات اصلی در به‌کارگیری روبات‌ها در کشاورزی طراحی سینماتیکی مناسب مفصل‌ها و رابط‌ها برای انجام عملیات کاری است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی فضای کاری این بازوهای مکانیکی و مقایسه آن با روش‌های محاسباتی می‌توان نتیجه گرفت، به‌کارگیری این نمونه روبات‌ها در عملیات جابه‌جایی محصولات در زمین به‌عنوان یک کمک کاربر (راننده) کمتر از یک چهارم زمان عملیات عادی را خواهد برد. علاوه بر این‌که از نظر میزان مصرف انرژی و هزینه در بازه زمانی مشخص دارای توجیه اقتصادی است. پیکربندی نوع ۱ براساس بررسی‌های انجام شده از نظر سینماتیکی مسیر حرکت را در هر دو آزمون با شاخص چالاکی بالاتری طی نموده است و شاخص فضای کاری آن نیز براساس هر

1- PUMA Robot

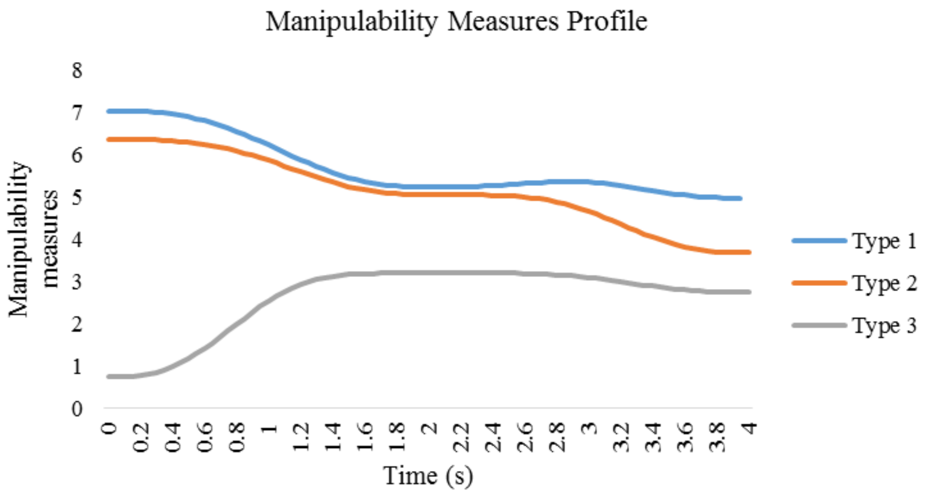
دو معیار محاسبه شده مناسب‌تر بوده و انتخاب ما در این پروژه خواهد بود. انتخاب مناسب پیکربندی بازوی‌های مکانیکی ماهر در کشاورزی براساس حداقل مصرف زمان و هزینه و بهینه‌سازی شاخص‌های چالاکی، عامل مهمی در طراحی، ساخت و تجاری‌سازی این بازوها محسوب می‌شود.

$$l_3 = \gamma . l_2 \quad , \gamma = 0.5, 1, 2 \; (0^{\circ} \leq \theta_2 \leq 90^{\circ}) \qquad (۲۸)$$



شکل ۸- تغییرات شاخص چالاکی بازو در نقاط مختلف مسیر در آزمون ۱ برای هرسه نوع پیکربندی روبات

Fig.8. Manipulability measure in path points-Test 2 for 3 Types



شکل ۹- تغییرات شاخص چالاکی بازو در نقاط مختلف مسیر در آزمون ۲ برای هرسه نوع پیکربندی روبات

Fig.9. Manipulability measure in path points-Test 2 for 3 Types

References

1. Baur, J. & Pfaff, J. (2012). *Design and development of a redundant modular multipurpose agricultural manipulator*. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE/ASME, Taiwan. https://doi.org/10.1109/AIM.2012.6265928

2. Belforte, G. (2006). Robot Design and Testing for Greenhouse Applications. *Biosystems Engineering*, *95*, 309-321. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.07.004
3. Craig, J. (2005). Introduction to Robotics Mechanics and Control. Third Edition. Pearson Prentice Hall. USA.
4. Gan, Y., Yu, W., He, W., Wang, J., & Sun, F. (2014). The Research about Prescribed Workspace for Optimal Design of 6R Robot. *Modern Mechanical Engineering*, *4*, 154-163. https://doi.org/10.4236/mme.2014.43015
5. Korayem, M. H., Ahmadi, R., Jaafari, N., Jamali, Y., & Kiomarsi, M. (2008). Design, Modeling, Implementation and Experimental Analysis of a 6R robot. *IJE Transactions*, *21*, 71-84.
6. Kucuk, S., & Bingul, Z. (2006). Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, *54*, 567-573. https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.002
7. Li, Z., Liu, J., Li, P., & Li, W. (2008). *Analysis of Workspace and Kinematics for a Tomato Harvesting Robot*. Proceedings International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China. https://doi.org/10.1109/ICICTA.2008.138
8. Merlet, J. P. (2006). *Parallel Robots*. Springer Press. Netherlands.
9. Moghimi, A., Aghkhani, M. H., & Golzarian, M. R. (2015). Designing of Computer Vision Algorithm to Detect Sweet Pepper for Robotic Harvesting Under Natural Light. *Journal of Agricultural Machinery*, *5*, 82-91. https://doi.org/10.22067/jam.v5i1.23528
10. Monta, M., Kondo, N., & Ting, K. (1998). End Effectors for Tomato Harvesting Robot. *Artificial Intelligence Review*, *12*, 11-25.
11. Sakai, S., Iida, M., & Osuka, K. (2008). Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots. *Autonomous Robots*, *25*, 189-204.
12. Sakai, S., Iida, M., & Umeda, M. (2002). *Heavy Material Handling Manipulator for Agricultural Robot*. International Conference on Robotic & Automation. IEEE, Washington, USA. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013496
13. Sivaraman, B. (2006). Using Modern Robot Synthesis and Analysis Tools for the Design of Agricultural Manipulators. *Agricultural Engineering International CIGR Ejournal*, *VIII*, 1-16.
14. Sivaraman, B. (2007). *Robot Manipulator for Citrus Harvesting*. Annual International Meeting Minneapolis Convention Center. ASABE, Minneapolis, Minnesota.
15. Sivaraman, B., & Bruks, T. F. (2006). Geometric Performance Indices for Analysis and Synthesis of Manipulators for Robotic Harvesting. *Transaction of ASABE*, *49*(5), 1589-1597. https://doi.org/10.13031/2013.22033
16. Spong, W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2004). *Robot Dynamics and Control*. John Wiley Press. USA.
17. Yoshikawa, T. (1985). Manipulability of robotic mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, *4*, 3. https://doi.org/10.1177/027836498500400201